生长猪基础饲粮组成对磷酸氢钙和磷酸二氢钙中磷的全肠道真消化率的影响[1]

刘正群[1] 张祖翔[2] 陈 亮[1] 刘静波[1,2] 张宏福[1*]

(1.中国农业科学院北京畜牧兽医研究所，动物营养学国家重点实验室，北京 100193；2.西南科技大学生命科学与工程学院，绵阳 621010）

摘 要：本试验旨在研究生长猪基础饲粮组成对磷酸氢钙（DCP）和磷酸二氢钙（MCP）中磷的全肠道真消化率（TTTD）的影响。试验 1 选用 10 头平均体重为(30.4±1.8) kg 的生长猪，按照 10×8 不完全拉丁方设计，分别饲喂含有 5 个 DCP 添加水平的玉米-豆粕型和含有 5 个 DCP 添加水平的小麦-豆粕型饲粮，进行 8 期消化试验；试验 2 选用 10 头平均体重为(30.9±1.5) kg 的生长猪，按照 10×8 不完全拉丁方设计，分别饲喂含有 5 个 MCP 添加水平的玉米-豆粕型和含有 5 个 MCP 添加水平的小麦-豆粕型饲粮，进行 8 期消化试验。每期消化试验包括 5 d 的饲粮适应期和 2 d 的粪便收集期。结果表明：1）玉米-豆粕型饲粮的总粪磷排泄量极显著高于小麦-豆粕型饲粮（$P<0.01$），小麦-豆粕型饲粮的全肠道可消化磷含量和磷的表观全肠道消化率（ATTD）极显著高于玉米-豆粕型饲粮（$P<0.01$）。饲粮添加 DCP 和 MCP 线性增加总粪磷排泄量、全肠道可消化磷含量及磷的 ATTD（$P<0.01$）。2）通过使用线性回归法，测得生长猪采食玉米-豆粕型和小麦-豆粕型饲粮对 DCP 中磷的 TTTD 分别为 82.33%和 82.88%，生长猪采食玉米-豆粕型和小麦-豆粕型饲粮对 MCP 中磷的 TTTD 分别为 85.88%和 84.62%。由此可见，生长猪基础饲粮组成对 DCP 和 MCP 中磷的 TTTD 无显著影响。

关键词：磷；基础饲粮；生长猪；全肠道真消化率；磷酸氢钙；磷酸二氢钙

中图分类号：S828 文献标识码： 文章编号：

收稿日期：2016-01-29

基金项目：国家科技支撑计划项目（2012BDA39B01，2013BAD21B02-01)；中国农业科学院科技创新工程（ASTIP-IAS07）

作者简介：刘正群（1991-），男，山东聊城人，硕士，从事猪营养研究。E-mail: liuzhengqun2015@163.com

*通信作者：张宏福，研究员，博士生导师，E-mail: zhanghongfu@caas.cn

磷是动物体所必需的矿物质元素之一，对机体的生理功能和代谢功能起着重要的作用。但植物性饲料中磷含量较低，而且 60%~80%是以植酸盐的形式存在，由于单胃动物体内缺少分解植酸盐的内源酶系统，因而极少能被单胃动物所利用[1]。为提高动物生长性能，有必要在饲粮中添加无机磷以满足动物的营养需要量，目前使用较为广泛的无机磷主要包括磷酸氢钙（dicalcium phosphate,DCP）和磷酸二氢钙（monocalcium phosphate,MCP）[2-4]。前期研究表明，通过使用线性回归模型分析饲粮总磷摄入量与动物可消化磷之间的关系，可推导出饲料原料中磷的真消化率和猪内源磷排泄量[5-8]。影响饲粮中磷的消化率的因素有多种，包括饲粮磷水平、钙磷比、植酸酶活性以及饲粮中粗纤维和碳水化合物的组成和含量等[8-14]。Nortey 等[14]研究发现，以小麦作为基础饲粮，使用小麦次粉部分替换基础饲粮的小麦，结果表明，磷的表观回肠和全肠道消化率随着小麦次粉替换小麦水平的增加而显著降低。以上结果表明，饲粮中碳水化合物组成及含量显著影响磷的消化利用效率。因此，为提高生长猪对饲料中无机磷的利用效率，应弄清楚无机磷中磷的消化率是否受到基础饲粮组成的影响。考虑到玉米和小麦在植酸酶活性和饲粮碳水化合物组成上存在显著差异，且二者是猪饲粮中主要的能量饲料，本试验通过在玉米-豆粕型饲粮和小麦-豆粕型饲粮中分别添加不同水平 DCP 和 MCP，比较基础饲粮组成对 DCP 和 MCP 中无机磷的全肠道真消化率（true total tract digestibility,TTTD）的影响。

1　材料与方法

1.1　试验设计和饲养管理

试验在动物营养学国家重点实验室昌平试验基地进行。试验 1 选用 10 头平均体重（30.4±1.8） kg 的“杜×长×大”三元杂交阉公猪，采用 10×8 不完全拉丁方设计，分别饲喂含有 5 种 DCP 添加水平的玉米-豆粕型和含有 5 种 DCP 添加水平的小麦-豆粕型饲粮，进行 8 期消化试验，试验 1 饲粮组成及营养水平见表 1。试验 2 选用 10 头平均体重为（30.9±1.5） kg 的“杜×长×大”三元杂交阉公猪，按照 10×8 不完全拉丁方设计，分别饲喂含有 5 种 MCP

添加水平的玉米-豆粕型和含有 5 种 MCP 添加水平的小麦-豆粕型饲粮，进行 8 期消化试验，试验 2 饲粮组成及营养水平见表 2。试验动物于不锈钢代谢笼内饲养，自然光照，室温控制在 20 ℃左右。每期消化试验包括 5 d 的饲粮适应期和 2 d 的粪便收集期。采食量根据试验动物体重的 4%计算得出，分 2 次分别于每天 08：00 和 17：00 饲喂，试验期间试验动物自由饮水。

1.2　样本收集和处理

试验经过 5 d 饲粮适应期后，在试验期的第 6 天和第 7 天 08:00 至 18:00 收集试验动物排出的全部粪便。收集粪便样品后立即置于-20 ℃冰箱中冷冻保存，待试验结束后将每头猪收集的全部粪便样品混合均匀后，置于 65 ℃烘箱干燥后粉碎待测。

1.3　测定指标与方法

试验饲粮的常规营养成分及粪便样品的干物质、总磷含量的测定参考张丽英[15]测定方法，三氧化二铬含量参考 Fenton 等[16]提出的方法进行测定。

1.4　磷的消化率计算方法

磷的表观全肠道消化率（apparent total tract digestibility,ATTD）按照以下公式计算：

磷的 ATTD（%）=100－[（饲粮中铬含量/粪中铬含量）×（粪中磷含量/饲粮中磷含量）×100]。

总粪磷排泄量根据以下公式计算：

总粪磷排泄量（mg/kg）=（饲粮中铬含量/粪中铬含量）×粪中磷含量×饲粮干物质含量×100。

全肠道的可消化磷含量计算根据以下公式：

全肠道可消化磷（mg/kg）=饲粮总磷摄入量－全肠道磷的排泄量。

使用线性回归法测定磷的 TTTD 按照公式：

可消化磷（mg/kg）=TTTD×总磷摄入量－内源磷排泄量。

如上述公式所描述，使用全肠道可消化磷含量与饲粮总磷摄入量做回归方程，得出的回归方程斜率即为饲粮中磷的 TTTD。

1.5 统计分析

使用 SAS 9.3 统计分析软件中的一般线性模型(GLM)程序进行方差分析和显著性检验，并进行多重比较。结果以平均值±标准误表示，差异显著水平为 P<0.05 和 P<0.01。

2 结果与分析

试验期间所有生长猪健康状况正常，并按照相应的采食量采食完所有试验饲粮。

2.1 饲粮添加 DCP 对生长猪磷消化率的影响（试验 1）

由表 3 可知，总粪磷排泄量、全肠道可消化磷含量及磷的 ATTD 均随着 DCP 在玉米-豆粕型饲粮和小麦-豆粕型饲粮中添加水平的增加而线性增加（P<0.01），且总粪磷排泄量和磷的 ATTD 随着 DCP 在玉米-豆粕型饲粮中添加水平的增加而呈二次函数增加（P<0.05）。在添加 DCP 后，玉米-豆粕型饲粮中总粪磷排泄量极显著高于小麦-豆粕型饲粮（P<0.01），而小麦-豆粕型饲粮中的全肠道可消化磷含量及磷的 ATTD 极显著高于玉米-豆粕型饲粮（P<0.01）。但饲粮类型和磷水平的互作效应对总粪磷排泄量、全肠道可消化磷含量及磷的 ATTD 的影响不显著（P>0.05）。

全肠道可消化磷与总磷摄入量之间显著线性相关是使用线性回归法测定磷的真消化率的前提条件，本试验结果满足上述条件。根据回归方程的公式，以 mg/kg 为单位计算磷的排泄量，由此得出的线性回归方程。由表 5 可知，生长猪采食添加 DCP 的玉米-豆粕型饲粮和小麦-豆粕型饲粮后，得到的回归方程分别为 Y=0.823 3X–2 035.54 和 Y=0.828 8X–1 840.51。其中 Y 表示可消化磷含量，X 代表饲粮总磷摄入量。生长猪对玉米-豆粕型饲粮和小麦-豆粕型饲粮 DCP 中磷的 TTTD 分为 82.33%和 82.88%，二者差异不显著（P>0.05）。其相应的内源性磷损失分别为 2 036 和 1 841 mg/kg 干物质摄入量，其回归方程相应的决定系数（R^2）分别为 0.948 1 和 0.936 4，回归方程拟合良好。

2.2 饲粮添加 MCP 对生长猪磷消化率的影响（试验 2）

由表 4 可知，玉米-豆粕型饲粮和小麦-豆粕型饲粮中，随着 MCP 添加水平的增加，总粪磷排泄量、全肠道可消化磷含量及磷的 ATTD 均呈线性增加（P<0.01）。在玉米-豆粕型饲粮和小麦-豆粕型饲粮中添加 MCP 后，小麦-豆粕型饲粮中总粪磷排泄量极显著低于玉米-豆粕型饲粮（P<0.01），但小麦-豆粕型饲粮中全肠道可消化磷含量及磷的 ATTD 极显著高于玉米-豆粕型饲粮（P<0.01）。但饲粮类型和磷水平的交互作用对总粪磷排泄量、全肠道可消化磷含量及磷的 ATTD 均无显著影响（P>0.05）。

由表 5 可知，通过线性回归法，生长猪采食添加 MCP 的玉米-豆粕型饲粮和小麦-豆粕型饲粮后，得到的回归方程分别 Y=0.8588X–2 062.44 和 Y=0.8462X–1 874.62，生长猪基础饲粮组成对 MCP 中磷的 TTTD 分别为 85.88%和 84.62%，二者无显著差异（P>0.05）。内源性磷损失分别为 2 062 和 1 875 mg/kg 干物质摄入量，其回归方程相应的 R^2 分别为 0.913 1 和 0.922 8，回归方程拟合良好。

3 讨 论

3.1 基础饲粮组成对生长猪磷的 ATTD 的影响

在本试验条件下，在无 DCP 和 MCP 添加的玉米-豆粕型和小麦-豆粕型饲粮中生长猪对磷的 ATTD 分别为 16.91%～18.27%和 28.99%～30.43%，与刘正群等[16]报道磷的 ATTD 均基本相近。通过在玉米-豆粕型和小麦-豆粕型 2 种类型饲粮中添加可消化磷含量较高的 DCP，可显著提高总粪磷排泄量及全肠道可消化磷含量，磷的 ATTD 也相应增加，这与 Wu 等[7]、刘正群等[17]及 Seynaeve 等[18]研究结果一致。通过在上述 2 种类型饲粮中添加富含可消化磷的 MCP 时，也均可显著提高总粪磷排泄量、全肠道可消化磷含量及生长猪对磷的 ATTD，这与 Stein 等[19]研究结果一致。且 Beers 等[20]研究也发现，在仔猪饲粮中添加 MCP 也可显著提高仔猪对磷的 ATTD。在总磷含量相近的 2 种类型饲粮中，生长猪对小麦-豆粕型饲粮中磷的 ATTD 显著高于玉米-豆粕型饲粮中磷的 ATTD，这可能与小麦中的可消化磷含量高

于玉米中的可消化磷含量相关[21]。故在畜牧业生产中，为减少环境的中磷排放，可以考虑用小麦部分替代玉米作为能量饲料。

3.2 基础饲粮组成对生长猪磷的 TTTD 的影响

目前饲料原料中磷真消化率的评定方法主要包括同位素稀释技术、差量法及线性回归法等[22]。在各种测定方法中，由 Fan 等[5]和 Shen 等[6]提出的线性回归法被认为是测定饲料原料中磷的真消化率和动物内源磷排泄量的可靠方法，且使用较为广泛。线性回归法测定结果是否准确主要在于动物内源磷排泄量和待测饲料原料中磷的真消化率不受饲粮磷水平影响的前提假设是否成立[5]，本试验满足上述条件。

目前，关于生长猪对饲粮中无机磷源中磷真消化率的报道较少，Petersen 等[4]通过饲喂无磷饲粮法测得生长猪对常用的无机磷源中磷的 TTTD。本试验通过在玉米-豆粕型和小麦-豆粕型饲粮中添加不同水平的 DCP 及 MCP 作为无机磷源，通过使用线性回归法，测得了生长猪对添加无机磷源中磷的 TTTD。其结果显示，添加 DCP 作为无机磷源的玉米-豆粕型以及小麦-豆粕型饲粮中磷的 TTTD 分别为 82.33%和 82.88%，添加 MCP 作为无机磷源的 2 种饲粮中磷的 TTTD 分别为 85.88%和 84.62%，2 种基础饲粮对 2 种无机磷源中磷 TTTD 均无显著差距。由线性回归方程可知，生长猪对添加 MCP 的饲粮组磷的 TTTD 高于添加 DCP 饲粮组磷的 TTTD，该结果与 Jongbloed 等[2]、Eeckhout 等[3]和 Petersen 等[4]研究结果一致。但本试验通过线性回归法测定的生长猪对 DCP 和 MCP 中磷的 TTTD 值均低于 Petersen 等[4]通过无磷饲粮法测得的磷的 TTTD，究其原因，可能在于本试验饲粮中总磷的来源除添加的无机磷源外，还由玉米-豆粕型和小麦-豆粕型 2 种基础饲粮提供。

4 结　论

生长猪基础饲粮组成对 DCP 和 MCP 中磷的 TTTD 无显著影响。因此，使用 DCP 和 MCP 中磷的 TTTD 用于配制生长猪饲粮时无需考虑基础饲粮中碳水化合物和植酸酶活性对 DCP 和 MCP 中磷消化率的影响。

参考文献：

[1] WEREMKO D,FANDREJEWSKI H,ZEBROWSKA T,et al.Bioavailability of phosphorus in feeds of plant origin for pigs[J].Asian Australasian Journal of Animal Sciences,1997,10(6):551–566.

[2] JONGBLOED A W,EVERTS H,KEMME P A.Phosphorus availability and requirements in pigs[M]//Heinemann.Recent Advances in Animal Nutrition.London,UK:Butterworth,1991:65–80.

[3] EECKHOUT W,DE PAEPE M.The digestibility of three calcium phosphates for pigs as measured by difference and by slope-ratio assay[J].Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition,1997,77(1/2/3/4/5):53–60.

[4] PETERSEN G I,STEIN H H.Novel procedure for estimating endogenous losses and measurement of apparent and true digestibility of phosphorus by growing pigs[J].Journal of Animal Science,2006,84(8):2126–2132.

[5] FAN M Z,ARCHBOLD T,SAUER W C,et al.Novel methodology allows simultaneous measurement of true phosphorus digestibility and the gastrointestinal endogenous phosphorus outputs in studies with pigs[J].The Journal of Nutrition,2001,131(9):2388–2396.

[6] SHEN Y R,FAN M Z,AJAKAIYE A,et al.Use of the regression analysis technique to determine the true phosphorus digestibility and the endogenous phosphorus output associated with corn in growing pigs[J].The Journal of Nutrition,2002,132(6):1199–1206.

[7] WU X,RUAN Z,ZHANG Y G,et al.True digestibility of phosphorus in different resources of feed ingredients in growing pigs[J].Asian Australasian Journal of Animal Sciences,2008,21(1):107–119.

[8] LIU J B,YANG Y K,HE J,et al.Comparison of two diet types in the estimation of true digestibility of phosphorus in soybean and canola meals for growing pigs by the regression method[J].Livestock Science,2014,167:269–275.

[9] LIU J,BOLLINGER D W,LEDOUX D R,et al.Effects of dietary calcium:phosphorus ratios on apparent absorption of calcium and phosphorus in the small intestine,cecum,and colon of pigs[J].Journal of Animal Science,2000,78(1):106–109.

[10] JOHNSON S L,WILLIAMS S B,SOUTHERN L L,et al.Effect of phytase addition and dietary calcium and phosphorus levels on plasma metabolites and ileal and total-tract nutrient digestibility in pigs[J].Journal of Animal Science,2004,82(3):705–714.

[11] AKINMUSIRE A S,ADEOLA O.True digestibility of phosphorus in canola and soybean meals for growing pigs:influence of microbial phytase[J].Journal of Animal Science,2009,87(3):977–983.

[12] KEMME P A,RADCLIFFE J S,JONGBLOED A W,et al.Factors affecting phosphorus and calcium digestibility in diets for growing-finishing pigs[J].Journal of Animal Science,1997,75(8):2139–2146.

[13] METZLER B U,MOSENTHIN R.A review of interactions between dietary fiber and the gastrointestinal microbiota and their consequences on intestinal phosphorus metabolism in growing pigs[J].Asian Australasian Journal of Animal Sciences,2008,21(4):603–615.

[14] NORTEY T N,PATIENCE J F,SIMMINS P H,et al.Effects of individual or combined xylanase and phytase supplementation on energy,amino acid,and phosphorus digestibility and growth performance of grower pigs fed wheat-based diets containing wheat millrun[J].Journal of Animal Science,2007,85(6):1432–1443.

[15] 张丽英.饲料分析及饲料质量检测技术[M].2 版.北京:中国农业大学出版社,2003.

[16] FENTON T W,FENTON M.An improved procedure for the determination of chromic oxide in feed and feces[J].Canadian Journal of Animal Science,1979,59(3):631–634.

[17] 刘正群,刘静波,吕帅兵,等.饲粮类型和磷水平对生长猪后肠磷消化率的影响[J].动物营养学报,2015,27(8):2509–2516.

[18] SEYNAEVE M,JANSSENS G,HESTA M,et al.Effects of dietary Ca/P ratio,P level and microbial phytase supplementation on nutrient digestibilities in growing pigs:precaecal,post-ileal and total tract disappearances of OM,P and Ca[J].Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition,2000,83(1):36–48.

[19] STEIN H H,KADZERE C T,KIM S W,et al.Influence of dietary phosphorus concentration on the digestibility of phosphorus in monocalcium phosphate by growing pigs[J].Journal of Animal Science,2008,86(8):1861–1867.

[20] BEERS S,JONGBLOED A W.Effect of supplementary *Aspergillus niger* phytase in diets for piglets on their performance and apparent digestibility of phosphorus[J].Animal Production,1992,55(3):425–430.

[21] 冯占雨,乔家运.在肥育猪和母猪饲粮中利用小麦替代玉米的应用研究[J].养猪,2012(4):13–16.

[22] 罗赞,贺建华.猪用饲料原料有效磷评定方法的研究[J].饲料工业,2008,29(5):53–58.

Effects of Basal Diet Composition on True Total Tract Digestibility of Phosphorus in Dicalcium Phosphate and Monocalcium Phosphate for Growing Pigs[2]

LIU Zhengqun[1] ZHANG Zuxiang[2] CHEN Liang[1] LIU Jingbo[1,2] ZHANG Hongfu[1*]

（1. *State Key Laboratory of Animal Nutrition*, *Institute of Animal Sciences*, *Chinese Academy of Agricultural Sciences*, *Beijing* 100193, *China*; 2. *School of Life Science and Engineering*, *Southwest University of Science and Technology*, *Mianyang* 621010, *China*)

Abstract: Two experiments were conducted to investigate the effects of basal diet composition on the determination of true total tract digestibility (TTTD) of phosphorus (P) in dicalcium phosphate (DCP) and monocalcium phosphate (MCP) for growing pigs. In experiment 1, ten growing pigs with (30.4±1.8) kg average body weight (BW) were fed with 5 DCP supplemental levels of corn soybean meal (CSBM) diets and 5 DCP supplemental levels of wheat soybean meal (WSBM) diets in a 10×8 incomplete Latin square design. In experiment 2, ten growing pigs with (30.9±1.5) kg average BW were fed with 5 MCP supplemental levels of CSBM diets and 5 MCP supplemental levels of WSBM diets in a 10×8 incomplete Latin square design. Each experiment contained eight digestion periods and each period lasted for 7 days (5 days for adaptation and 2 days for fecal sample collection. The results showed as follows: 1) total tract P output in the CSBM diets was significant higher than that in the WSBM diets (*P*<0.01), while the total tract digestible P content and apparent total tract digestibility (ATTD) of P in the CSBM diets were higher than those in the WSBM diets (*P*<0.01). The total tract P output, total tract digestible P content and ATTD of P linearly increased as P from DCP or MCP added to the diet (*P*<0.01). 2) By using the linear regression method, the estimated true total tract digestibility (TTTD) of P in DCP for pigs fed CSBM and WSBM diet to be 82.33% and 82.88%, respectively. the TTTD of P in MCP for pigs fed CSBM and WSBM diet to be 85.88% and 84.62%, respectively. In conclusion, the TTTD of P in DCP or MCP for growing pigs is not affected by basal diet composition.

Key words: phosphorus; basal diet; growing pigs; true total tract digestibility; dicalcium phosphate; monocalcium phosphate

---

*Corresponding author, professor, E-mail: zhanghongfu@caas.cn (责任编辑 武海龙)

表 1 试验 1 饲粮组成及营养水平（饲喂基础）

Table 1 Composition and nutrient levels of diets used in experiment 1 (as-fed basis) %

项目 Items	玉米-豆粕型饲粮 Corn-soybean meal diet					小麦-豆粕型饲粮 Wheat-soybean meal diet				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
原料 Ingredients										
玉米 Corn	70.49	70.14	69.79	69.44	69.09					
小麦 Wheat						77.34	76.99	76.64	76.29	75.94
豆粕 Soybean meal	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00
赖氨酸 Lys	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
豆油 Soybean oil	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
蛋氨酸 Met	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
磷酸氢钙 $CaHPO_4$		0.37	0.74	1.11	1.48		0.37	0.74	1.11	1.48
石粉 Limestone	0.81	0.79	0.77	0.75	0.73	0.86	0.84	0.82	0.80	0.78
预混料 Premix[1)]	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
氯化胆碱 Choline chloride	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
三氧化二铬 Cr_2O_3	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
食盐 NaCl	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
苏氨酸 Thr	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
合计 Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
营养水平 Nutrient levels[2)]										
消化能 DE/(MJ/kg)	14.76	14.71	14.66	14.61	14.56	14.67	14.62	14.57	14.52	14.46
粗蛋白质 CP	17.78	17.82	17.89	17.72	17.69	18.59	18.31	18.32	18.08	17.92
总磷 TP	0.36	0.43	0.50	0.57	0.64	0.39	0.46	0.54	0.61	0.67
钙 Ca	0.40	0.49	0.57	0.65	0.74	0.42	0.51	0.59	0.68	0.76

[1)] 预混料为每千克饲粮提供 Premix provided per kilogram of diets： Cu （as $CuSO_4 \cdot 5H_2O$）20 mg，Fe （as $FeSO_4 \cdot 7H_2O$）120 mg，Mn （as $MnSO_4 \cdot H_2O$）30 mg，Zn （as Zn $SO_4 \cdot H_2O$）120 mg，Se (as Na_2SeO_3）0.5 mg，I （as KI）0.5 mg，VA 8 000 IU，VD_3 2 000 IU，VE 12 IU，VK_3 1.2 mg，VB_1 1.5 mg，VB_2 4 mg，VB_6 2 mg，VB_{12} 0.02 mg，生物素 boitin 0.08 mg，泛酸 pantothenic acid 12 mg，烟酸 nicotinic acid 20 mg，叶酸 folic acid 0.5 mg。

[2)] 消化能为计算值，其他为测定值。DE was a calculated value, while the others were measured values.

表 2 试验 2 饲粮组成和营养水平（饲喂基础）

Table 2 Composition and nutrient levels of diets used in experiment 2 (as-fed basis) %

项目 Items	玉米-豆粕型饲粮 Corn-soybean meal diet					小麦-豆粕型饲粮 Wheat-soybean meal diet				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
原料 Ingredients										
玉米 Corn	69.56	69.16	68.76	68.36	67.95					
小麦 Wheat						78.22	77.82	77.42	77.02	76.62
豆粕 Soybean meal	26.00	26.00	26.00	26.00	26.00	17.00	17.00	17.00	17.00	17.00
赖氨酸 Lys	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48
豆油 Soybean oil	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
蛋氨酸 Met	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
磷酸二氢钙 $Ca(H_2PO_4)_2$		0.33	0.66	0.99	1.32		0.33	0.66	0.99	1.32
石粉 Limestone	0.80	0.87	0.94	1.01	1.09	0.87	0.94	1.01	1.08	1.15
预混料 Premix[1)]	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
氯化胆碱 Choline chloride	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
三氧化二铬 Cr_2O_3	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
食盐 NaCl	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
苏氨酸 Thr	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
合计 Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
营养水平 Nutrient levels[2)]										
消化能 DE/(MJ/kg)	14.78	14.72	14.66	14.61	14.55	14.64	14.59	14.53	14.47	14.41
粗蛋白质 CP	17.63	17.61	17.75	17.55	17.78	18.22	18.09	18.22	18.11	17.64
总磷 TP	0.34	0.41	0.47	0.53	0.59	0.38	0.43	0.50	0.55	0.62
钙 Ca	0.41	0.50	0.58	0.65	0.74	0.42	0.51	0.59	0.67	0.75

[1)] 预混料为每千克饲粮提供 Premix provided per kilogram of diets： Cu（as $CuSO_4·5H_2O$）20 mg，Fe（as $FeSO_4·7H_2O$）120 mg，Mn（as $MnSO_4·H_2O$）30 mg，Zn（as Zn $SO_4·H_2O$）120 mg，Se (as Na_2SeO_3）0.5 mg，I（as KI）0.5 mg，VA 8 000 IU，VD_3 2 000 IU，VE 12 IU，VK_3 1.2 mg，VB_1 1.5 mg，VB_2 4 mg，VB_6 2 mg，VB_{12} 0.02 mg，生物素 boitin0.08 mg，泛酸 pantothenic acid 12 mg，烟酸 nicotinic acid 20 mg，叶酸 folic acid 0.5 mg。

[2)] 消化能为计算值，其他为测定值。DE was a calculated value, while the others were measured values.

表 3　饲粮添加磷酸氢钙对生长猪磷消化率的影响（试验 1）

Table 3　Effects of dietary dicalcium phosphate on the digestibility of phosphorus of growing pigs (experiment 1)

项目 Item	玉米-豆粕型饲粮 Corn-soybean meal diets					小麦-豆粕型饲粮 Wheat-soybean meal diets					SEM	P 值 P-value						
	磷酸氢钙供给的总磷 Total P derived from dicalcium phosphate/(g/kg)											饲粮类型 Diet type	磷水平 P level	互作效应 Interaction	玉米-豆粕型饲粮 Corn-soybean meal diets		小麦-豆粕型饲粮 Wheat-soybean meal diets	
	0.0	0.7	1.4	2.1	2.8	0.0	0.7	1.4	2.1	2.8					线性 Linear	二次 Quadratic	线性 Linear	二次 Quadratic
总磷摄入量 Total P intake/(mg/d)	3 188	3 779	4 416	5 102	5 725	3 511	4 141	4 789	5 452	5 962								
总粪磷排泄量 Total-tract P output/(mg/kg)	2 649	2 698	2 768	2 848	3 138	2 443	2 544	2 657	2 794	2 848	73	<0.001	<0.001	0.448	<0.001	0.035	<0.001	0.794
全肠道可消化磷 Total tract digestible P /(mg/kg)	539	1 080	1 647	2 255	2 587	1 069	1 598	2 133	2 658	3 115	66	<0.001	<0.001	0.864	<0.001	0.103	<0.001	0.571
磷的表观全肠道消化率 Apparent total tract digestibility of P/%	16.91	28.59	37.31	44.19	45.19	30.43	38.58	44.53	48.75	52.23	1.52	<0.001	<0.001	0.051	<0.001	<0.001	<0.001	0.080

表 4 饲粮添加磷酸二氢钙对生长猪磷消化率的影响（试验二）

Table 4 Effects of dietary monocalcium phosphate on the digestibility of phosphorus for growing pigs (experiment 2)

项目	玉米-豆粕型饲粮 Corn-soybean meal diets					小麦-豆粕型饲粮 Wheat-soybean meal diets						*P* 值 *P*-value						
	磷酸二氢钙供给的总磷 Total P derived from monocalcium phosphate/(g/kg)											饲粮类型	磷水平	互作效应	玉米-豆粕型饲粮 Corn-soybean meal diets		小麦-豆粕型饲粮 Wheat-soybean meal diets	
Item	0.0	0.7	1.4	2.1	2.8	0.0	0.7	1.4	2.1	2.8	SEM	Diet type	P level	Interaction	线性 Linear	二次 Quadratic	线性 Linear	二次 Quadratic
总磷摄入量 Total P intake/(mg/d)	2 985	3 584	4 111	4 657	5 098	3 353	3 865	4 454	4 951	5 484								
总粪磷排泄量 Total tract P output/(mg/kg)	2 440	2 665	2 591	2 714	2 787	2 381	2 502	2 584	2 668	2 719	76	<0.001	0.043	0.853	0.002	0.687	<0.001	0.603
全肠道可消化磷 Total tract digestible P /(mg/kg)	545	918	1 520	1 943	2 311	972	1 363	1 871	2 283	2 765	70	<0.001	<0.001	0.884	<0.001	0.488	<0.001	0.741
磷的表观全肠道消化率 Apparent total tract digestibility of P/%	18.27	25.63	36.96	41.72	45.34	28.99	35.27	41.50	46.12	50.42	1.76	<0.001	<0.001	0.239	<0.001	0.051	<0.001	0.301

表 5 生长猪基础饲粮类型对无机磷中磷真消化率的影响

Table 5 Effect of dietary type on the true digestibility of phosphorus in inorganic phosphorus for growing pigs

项目 Item	玉米-豆粕型饲粮 Corn-soybean meal diet	小麦-豆粕型饲粮 Wheat-soybean meal diet
试验 1（磷酸氢钙） Experiment 1 (dicalcium phosphate)		
回归方程 Regression equation	Y=0.823 3X–2 035.54	Y=0.828 8X–1 840.51
斜率的标准误 SE of the slope	0.030 8	0.035 0
截距的标准误 SE of the intercept	139.75	169.98
决定系数 Determination coefficient （R^2）	0.948 1	0.936 4
内源性磷损失 Endogenous P loss/（mg/kg）	2 036	1 841
磷的全肠道真消化率 True total tract digestibility of inorganic P/%	82.33	82.88
样本数 No. of pigs	40	40
试验 2（磷酸二氢钙） Experiment 2 (monocalcium phosphate)		
回归方程 Regression equation	Y=0.858 8X–2 062.44	Y=0.846 2X–1 874.62
斜率的标准误 SE of the slope	0.042 3	0.039 5
截距的标准误 SE of the intercept	176.02	177.41
决定系数 Determination coefficient （R^2）	0.913 1	0.922 8
内源性磷损失 Endogenous P loss/（mg/kg）	2 062	1 875
磷的全肠道真消化率 True total tract digestibility of inorganic P/%	85.88	84.62
样本数 Sample No.	40	40

Y 表示可消化磷，X 表示总磷摄入量。Y means digestible P, X means P intake.